

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ В АППАРАТАХ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

### Аннотация

*Представлена имитационная модель, позволяющая исследовать процесс сушки сыпучих материалов в аппаратах кипящего слоя колонного типа. Основное внимание уделено процессу сушки материалов нагретым воздухом, подаваемым под давлением при помощи вентиляторных установок в аппараты кипящего слоя. Имитационная модель позволяет в реальном времени работать как с одной, так и с тремя установками одновременно. Представлены модели, описывающие сложные процессы газодинамики и теплообмена. При помощи балансовых расчетов вычисляются важнейшие теплотехнические характеристики сушильных установок: расход теплоты на килограмм испаренной влаги, количество сухого воздуха, температуры и теплоемкости сушильных газов до и после поступления в агрегат. Подробно изложено взаимодействие пользователя с разработанной программой, приведены оконные интерфейсы имитационной модели.*

*Ключевые слова: аппарат кипящего слоя, вентиляторная установка, неоднородный режим, виртуальная лабораторная установка, вентиляционный клапан, фильтрационная секция, калориферная установка.*

### Abstract

*Presented simulation model allows to study the process of drying of bulk materials in the apparatus of fluidized bed type column. The focus is on the process of drying materials heated air delivered under pressure by means of the fan units in the fluidized bed apparatus. The simulation model allows real-time work as one, and with three settings at the same time. We present a model describing the complex processes of gas dynamics and heat transfer. With the balance of payments are calculated critical thermal performance drying plants: heat consumption per kilogram of evaporated water, the amount of dry air, the temperature and the specific heat drying gas before and after entering the unit. A detailed explanation of the user interaction with our program, given window interface simulation model.*

*Keywords: fluidized bed unit, fan installation, heterogeneous mode, a virtual laboratory installation, vent the filter section, air heater installation.*

Виртуальная лабораторная установка представляет собой программный комплекс, позволяющий проводить исследования на компьютере без непосредственного контакта с реальной лабораторной установкой или стендом. Виртуальная установка, как правило, сочетает в себе имитационную динамическую модель оборудования и оболочку, включающую методическое сопровождение лабораторной работы. Динамическая модель формируется из совокупности элементов управления, позволяющих регулировать конкретные входные параметры и считывать выходные параметры опыта, тем самым имитируя протекание физических процессов.

С развитием компьютерной графики стало возможным создавать высокореалистичные трехмерные модели лабораторных установок, станков, приборов и прочих объектов. Гармоничное сочетание текстур материалов и освещения, а также возможность перемещения камеры в трехмерном пространстве, дает наиболее полное ощущение виртуальной реальности.

Представленная виртуальная лабораторная установка разработана в среде Visual Basic.NET – это новый мощный язык программирования, созданный корпорацией Microsoft.

Этот язык программирования не позволяет программировать по-старому, т.к. по сути, является совершенно другим языком, таким же, как и любой другой язык программирования для платформы .NET. Индивидуальность языка, так же как и его преимущества (простота, скромность создания программ, лёгкость использования готовых компонент) при использовании в среде .NET не имеют такого значения, как раньше – всё сосредоточено на возможностях самой системы .NET, на её библиотеке классов. Сохранив во многом внешнюю простоту своего предшественника – языка Visual Basic 6.0 – он радикально обогатил и усложнил свое внутреннее содержание, предоставив программисту огромное количество новейших инструментов. Самый главный из них – настоящее, полноценное объектно-ориентированное программирование. Среда разработки Visual Basic считается идеальным средством быстрой разработки прототипов программы, для разработки приложений баз данных и вообще для компонентного способа создания программ, работающих под управлением операционных систем семейства Microsoft Windows [1–3].

В основу созданной виртуальной лабораторной установки положена работа, изложенная в [4–6] и модернизирована с учетом [7, 8]. Прежде всего, установка ориентирована на: исследование процесса сушки сыпучих материалов, поступающих в аппараты кипящего слоя; изучение газодинамических режимов слоя в зависимости от состава материала и характера потока воздуха, формируемого вентиляторными установками.

Виртуальная лабораторная работа состоит из двух основных программных окон, представленных на рисунке 1, 2. Во время работы открываются и другие окна, отображающие уставки вентиляционных, калориферных и фильтрационных установок.



Рис. 1. Окно с расстановкой напорных вентиляторов, калориферов и фильтров

Как видно из рисунков, одновременно можно работать с тремя аппаратами кипящего слоя, для которых отдельными секциями предусмотрены напорный вентилятор, калориферная и фильтрационная установки. Кликнув на любую установку можно легко изменить ее производительность в всплывающем диалоговом окне. Максимальный расход воздуха развиваемый вентиляторной установкой – 30 тыс. м<sup>3</sup>/ч, а создаваемый напор – до 12 кПа. В качестве греющего теплоносителя в калориферной установке используется обычная вода с максимальной температурой 150 °С, причем температура воды может регулироваться балансировочной арматурой. В настройках секции фильтра задается фильтрующий материал и его эффективность. У аппаратов кипящего слоя задаются их конструктивные характеристики (диаметр и высота колонны, диаметр и шаг расположения отверстий решетки на которую подается сыпучий материал). Программа содержит расширяемую базу данных, разработанную в Access, и содержит все основные характеристики сыпучих материалов (материал частиц, их диаметр и форма, температура и влажность). После того, как все настройки выпол-

нены приступают к запуску установки. В реальном времени отображаются начальные и конечные температура и влажность воздуха, масса загружаемого материала до и после сушки, время нахождения материала в аппарате кипящего слоя. Во время работы установки возможна корректировка: расхода и напора воздуха путем изменения числа оборотов вентиляторных установок или положение угла дроссельных клапанов; температуры теплоносителя калориферных установок. У аппаратов кипящего слоя возможно изменение расхода и времени пребывания сыпучих материалов в аппарате.



Рис. 2. Окно с расстановкой аппаратов кипящего слоя

Во время процесса сушки в аппаратах кипящего слоя протекают сложные процессы газодинамики и теплообмена, в реальном времени рассчитываются уравнения материального и теплового балансов. В их основе лежат законы сохранения вещества и энергии.

Балансовые расчеты позволяют получить важнейшие теплотехнические характеристики сушильных установок: расход теплоты, на килограмм испаренной влаги, количество сухого воздуха (подаваемого в агрегат), изменение параметров теплоносителя.

Материальный и тепловой балансы, для простейшего случая непрерывной сушки влажного материала нагретым воздухом будут выглядеть следующем образом. Считается, что сушимый материал и нагретый воздух состоят из сухой части и влаги. Для сушилок непрерывного действия материальный баланс составляется для часовых расходов воздуха, влаги, материала. При составлении материального баланса периодически действующей сушилки расчеты ведут в целом на цикл ее работы.

Приходная и расходная части материального баланса непрерывно действующей сушилки с однократным использованием воздуха выглядит следующим образом:

$$L_{c.61} + G_{c1} + G_{61} = L_{c.62} + G_{c2} + G_{62}, \quad (1)$$

где  $L_{c.61}$ ,  $L_{c.62}$  – количество воздуха на входе и выходе аппарата кипящего слоя, кг;  $G_{c1}$ ,  $G_{c2}$  – количество влаги, содержащейся в материале, до и после сушки, кг;  $G_{61}$ ,  $G_{62}$  – количество влаги, до и после сушки, кг.

Тепловой баланс, составляемый при проектировании сушильных установок, кВт, позволяет аналитически определить расход теплоносителя, топлива, а также основные теплотехнические показатели процесса:

$$Q + Q_d + L_1 I_1 + G_{c1} t_{m1} + W_{c.61} t_{m1} = L_2 I_2 + G_{c2} t_{m2} + Q_m \quad (2)$$

где  $Q$  – количество тепла, переданное воздуху от калориферной установки, кВт;  $Q_d$  – количество дополнительно подведенной теплоты до калориферных установок, кВт;  $L_1$ ,  $L_2$  – расход воздуха на входе и выходе аппарата кипящего слоя, м<sup>3</sup>/ч;  $I_1$ ,  $I_2$  – энтальпия воздуха на входе и выходе, кДж/кг;  $G$  – количество сушеного материала, кг;  $c_1$  и  $c_2$  – удельные теплоемкости

сушеного материала до и после сушки, кДж/(кг<sup>0</sup>С);  $t_{m1}, t_{m2}$  – температура материала до и после сушки, °С;  $W$  – количество испаряемой влаги, кг/ч;  $c_{вл}$  – удельная теплоемкость влаги, кДж/(кг<sup>0</sup>С);  $Q_m$  – потери теплоты в окружающую среду, кВт.

Скорость процесса сушки влажного материала нагретым воздухом зависит от интенсивности внешнего и внутреннего тепло- и массообмена. Под внешним тепло- и массообменом понимается совокупность процессов, способствующих передаче тепла сушеному материалу и восприятию влаги, испарившейся с его поверхности. Интенсивность этих процессов применительно к конвективной сушке зависит от режимных параметров теплоносителя (нагретого воздуха), т. е. от его температуры, относительной влажности и скорости.

Перенос теплоты и перемещение влаги внутри сушеного материала (внутренний тепло- и массообмен) в некоторых случаях решающим образом влияют на скорость процесса сушки, так как от этих процессов зависит количество влаги, подведенной к поверхности испарения. Перенос теплоты и влаги во влажном материале, характер изменения в процессе сушки его физико-механических свойств определяются коллоидно-физическими свойствами и формой связи влаги с материалом. Процесс удаления влаги из материала происходит при нарушении связи ее с веществом скелета тела, на что затрачивается определенное количество энергии, поэтому классификация форм связи влаги с материалом должна учитывать величину этой энергии связи.

Количество тепла, переданного от газа к слою в зависимости от времени пребывания в аппарате описывается выражением

$$Q = \alpha_{\Sigma} \left( T_g - \frac{T_n + T_k}{2} \right) \cdot S \cdot t, \quad (3)$$

где  $\alpha_{\Sigma}$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, излучением и теплопроводностью, Вт/(м<sup>20</sup>С);  $T_g$  – температура газа, °С;  $T_n, T_k$  – соответственно начальная и конечная температура загружаемого материала, °С;  $S$  – площадь поперечного сечения слоя, м<sup>2</sup>;  $t$  – время пребывания слоя в аппарате, с.

Значение коэффициента  $\alpha_{\Sigma}$  определяется зависимостью выражением:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{кнв} + \alpha_{луч} + \alpha_{кнд}. \quad (4)$$

Конвективная составляющая теплообмена может быть определена по зависимости

$$\alpha_{кнв} = 0,142 \left( \lambda^{0,57} w^{0,8} p^{0,43} c^{0,43} (1 - m_{cm})^{0,133} \right) / \left( d^{0,2} \nu^{0,37} m_{cm}^{0,8} \right), \quad (5)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/м;  $w$  – скорость, м/с;  $p$  – давление, Па;  $c$  – теплоемкость, кДж/(кг<sup>0</sup>С);  $m_{cm}$  – порозность у теплообменной поверхности;  $d$  – диаметр частиц, м;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Коэффициент радиационного теплообмена рассчитывается по формуле

$$\alpha_{луч} = \sigma \varepsilon_{пр} \left( \left( \frac{T_n + T_k}{2} \right)^2 + T_g^2 \right) \left( \frac{T_n + T_k}{2} + T_g \right), \quad (6)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_{пр}$  – приведенная степень черноты.

Кондуктивный теплообмен между единицей поверхности и псевдоожиженным слоем зависит от относительной площади, приходящейся на частицы

$$\alpha_{кнд} = 8,95k / d(1 - m_{cm})^{2/3} \quad (7)$$

Повышение температуры в аппарате с псевдоожиженным слоем двояко сказывается на интенсивности внешнего теплообмена. Во-первых, происходит изменение теплофизических свойств дисперсного материала и оживающего агента. Во-вторых, усложняется механизм передачи энергии, существенным становится радиационный перенос, роль которого в низкотемпературных системах пренебрежимо мала. Главной особенностью процесса обмена излучением является необязательное наличие среды для передачи энергии.

Взаимодействие излучения с веществом – весьма сложный процесс, зависящий от множества факторов. Он реализуется тремя независимыми физическими механизмами: рассеянием, поглощением и излучением. Первые два обуславливают ослабление падающего излучения, последний усиливает его.

Для определения полных потерь давления с учетом поддержания слоя в псевдооживленном состоянии использована зависимость

$$P = \left(\frac{f}{F}\right)^2 \cdot \left(\frac{w}{Fc}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \left[ \left(1 + 0,707 \sqrt{1 - \frac{F}{f}}\right)^2 + \left(1,7 - \frac{F}{f}\right)^2 \right] + H_0 g (\rho_p - \rho)(1 - m_0), \quad (8)$$

где  $f$  – площадь подовой решетки аппарата кипящего слоя, м<sup>2</sup>;  $F$  – живое сечение решетки (площадь всех отверстий), м<sup>2</sup>; где  $F_c$  – доля живого сечения решетки м<sup>2</sup>;  $H_0$  – высота неподвижного слоя, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

Проверка адекватности моделей, использованных в программном комплексе, подтверждена на экспериментальной лабораторной установке, разработанной учеными кафедры информационных технологий в металлургии [9].

#### Список использованных источников

1. Гарнаев А. Самоучитель Visual Studio .NET 2003; БХВ-Петербург – Москва, 2013. – 688 с.
2. Голощапов А.Л. Microsoft Visual Studio 2010; БХВ-Петербург – Москва, 2011. – 544 с.
3. Левинсон Джефф. Тестирование ПО с помощью Visual Studio 2010; ЭКОМ Паблишерз. – Москва, 2012. – 314 с.
4. Оленников А.А., Морозов П.А., Смирнова Е.В. Виртуальный тренажер «вентиляционная установка» / Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией М.В. Темлянцева. Новокузнецк. – 2015. – С. 446-449.
5. Оленников А.А. Применение тепла отходящих газов от конвертерных печей в промышленных сушилах / Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией С.М. Кулакова. – 2006. – С. 272-274.
6. Гудукин Е.И., Оленников А.А., Цымбал В.П. Математические и физические модели агрегатов теплообмена и кипящего слоя / Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Под общей редакцией Л.П. Мышляева. Новокузнецк. – 2008. – С. 288-291.
7. Оленников, А.А. Математическое моделирование и комплекс программ для решения задач утилизации вторичной энергии отходящих газов металлургических агрегатов струйно-эмульсионного типа: дис....канд. техн. наук: 05.13.18: защищена 08.12.09: утв. 12.03.10. / А. А. Оленников – Новокузнецк, 2009. – 133 с.
8. Оленников А.А., Оленников Е.А., Захаров А.А. Программный комплекс для моделирования схем утилизации физической и химической энергии от отходящих газов металлургических агрегатов / Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1. – № 2 (2). – С. 185-192.
9. Оленников А.А., Падалко А.Г., Чапаев Д.Б. Автоматизированный лабораторный комплекс для исследований газодинамических режимов в агрегатах прямого восстановления / Системы автоматизации в образовании, науке и производстве труды VIII всероссийской научно-практической конференции. Новокузнецк. – 2011. – С. 522-526.

УДК 669-9

**А. А. Оленников, В. П. Цымбал, А. Г. Падалко, П. А. Сеченов**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,  
г. Новокузнецк, Россия